机载激光雷达技术与海原断裂带的精细地貌量化研究

陈涛^{①②}, 张培震^{①*}, 刘静^①, 李传友^①, 任治坤^①, KENNETH W. Hudnut^③

① 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;

② 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036;

③ United States Geological Survey, Pasadena CA, California 91106, USA

* 联系人, E-mail: peizhen@ies.ac.cn

2013-09-24 收稿, 2014-01-23 接受, 2014-04-04 网络版发表

中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1125)、中国地震局地震行业科研专项(201308012)、国家杰出青年科学基金(41225010)和国家留学人员科技活动择优资助项目资助

摘要 高分辨率、高精度的地形资料是活动断裂研究的基础, 机载激光雷达测距(light detection and ranging, LiDAR)系统的出现为精确高效获取精细地貌形态提供了新的解决方案. 本文基于海原断裂带机载 LiDAR 扫描项目所获得的地形数据, 发现 1920 年海原地震在哨马饮区段的同震位移, 并测量得到水平同震位移约为 8.6 m, 垂直同震位移约为 0.8 m. 另外, 还得到哨马饮冲沟累积位移量精确值, 结合前人测定的阶地年龄, 估算海原断层全新世以来的水平方向滑动速率为 4.0 ± 1.0 mm/a, 抬升的垂向速率下限为 0.4 ± 0.1 mm/a. 海原断裂带机载 LiDAR 实验表明, 基于 LiDAR 数据的精细地貌量化研究可以准确获取同震位移和累计位移, 减少滑动速率的不确定性, 得到之前难以计算的垂直运动速率, 从而加深对断裂带地震活动性和复发周期的认识, 理解全新世以来的断层活动特性.

关键词

机载 LiDAR
活动断裂带
定量地貌学
同震位移
累计位移
滑动速率

20 世纪初至今, 地震地质学的研究方法经历了从宏观到微观, 从定性到定量的发展历程. 不论是研究断裂活动习性、构造变形过程等基础理论, 还是探索强震复发规律和开展地震危险性评价的实际应用, 都强调精确获取断裂活动的定量信息. 但是, 断裂活动性研究的两个重要定量参数, 即断裂位移和被断错地貌体年代的测定, 却一直都存在较大不确定性, 成为制约地震地质学基础研究和实际应用的瓶颈. 随着近年来地球化学分析技术的突飞猛进, 年代学测试方法发展迅速, 例如利用宇宙成因核素年代测试法, 可以通过暴露在地表或埋藏在地表之下的沉积物宇宙成因核素浓度, 得到其代表地貌面的年代^[1-6]. 与此同时, 空间大地测量学也取得了重要进展. 例如, 日渐成熟的激光雷达测距(light detection and ranging, LiDAR)技术, 能够有效祛除地表植被或

人工地物的影响^[7-10], 快速测定大范围的高分辨率三维地形, 成为断裂带地表位错测量以及构造地貌量化研究的可靠技术手段.

2002 年, Harding 等人^[11]在利用机载 LiDAR 研究美国 Seattle 西部 Bainbridge 岛地下水分布时, 在 Seattle 断裂带内的森林覆盖区域发现了在以往的地质调查和航片解译中均未被发现的断层陡坎和海岸侵蚀阶地. 随后专门成立了 Puget Sound 激光雷达委员会^[12], 致力于研究基于 LiDAR 技术的活动断裂探测和地震危险性评价. 同年, Hudnut 等人^[13]在美国加州 Hector Mine 地震发生后, 沿地表破裂带采集了震后 LiDAR 数据, 并基于震后断层两侧高分辨率地形剖面获得了本次地震的近场同震位移. 自此, 机载 LiDAR 技术开始在地震地质学研究中, 尤其是构造地貌量化研究中崭露头角^[14-19]. 在国内, 2008 年汶

引用格式: 陈涛, 张培震, 刘静, 等. 机载激光雷达技术与海原断裂带的精细地貌量化研究. 科学通报, 2014, 59: 1293–1304

英文版见: Chen T, Zhang P Z, Liu J, et al. Quantitative study of tectonic geomorphology along Haiyuan fault based on airborne LiDAR. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0199-4

川 $M_w7.9$ 级地震^[20]发生后, Li^[21]和马洪超等人^[22]基于震后采集的汶川唐家山堰塞湖的 LiDAR 数据, 在短时间内获取了堰塞湖区域内滑坡的范围并精确计算出滑坡体积, 为地质灾害风险评估和抢险方案制订提供了科学依据. 2011 年, 刘静等人^[23]报道了沿海原断裂带开展 LiDAR 扫描实验项目, 高清晰度再现了海原断裂带沿线的断层几何形态和微构造地貌, 展示了机载 LiDAR 技术用于微地貌精细结构研究的巨大潜力.

海原断裂带位于我国青藏高原东北缘, 西连祁连山, 东接六盘山, 全长约 450 km, 属大型左旋走滑断裂带. 如图 1 所示, 从东向西依次为海原断裂、老虎山-毛毛山断裂和金强河-冷龙岭断裂^[24-30]. 1920 年 12 月, 海原断裂带东段曾发生海原里氏 8.5 级强震, 形成了长达 230 km 的地震地表破裂带, 最大左旋同震位移达 10.2 m^[25-30]. 由于地处西北内陆高原, 气候干燥, 植被稀疏, 海原大地震所形成的断头沟、断尾沟、断塞塘、断层陡坎等各种典型构造地貌至今仍保留完好, 是运用定量地貌学方法进行活动断裂研究的理想区域. 20 世纪 80 年代至今, 沿海原断裂带曾先后开展过野外地质调查^[25-33], 地球物理勘

探^[34,35]以及全球卫星定位(Global Position Satellite System, GPS)观测和遥感解译^[36-42]等, 对发震断裂构造和变形机制、断裂分段滑动速率和同震位移分布进行了系统研究. 在前人工作基础上, 本文基于 2011 年刘静等人^[23]沿海原断裂带采集 LiDAR 数据, 介绍了基于地貌参照物测量滑移距离的原理和 LiDAR 数据采集处理流程, 并以海原断裂带东段哨马饮区段为例, 展示了机载 LiDAR 技术在断层几何形态解析和构造地貌微特征识别等方面的应用潜力.

1 滑移距离测量原理

脆性剪切破裂在地壳浅表形成剪切断层带, 当断层带的两盘发生相对位移时, 各种横跨断层的地质地貌体将会形成沿断层面分布的位错, 这些地貌位错是研究断裂活动特性的重要基础. 由于断裂带内的水系或山脊沿断层发生断错的现象非常普遍, 因此测量位移距离时常以冲沟或山脊等作为参照地物. 根据现今地貌体所经历过的地震事件的次数, 地貌体被断层错动后形成的滑移距离可分为单次同震位移和累计位移. 如图 2 所示, 相邻的冲沟和山脊穿过左旋走滑断层, 剖面 1~4 均为平行于断层面的剖面,

图 1 海原断裂带概略位置及青藏高原东北缘主要断裂分布

图2 单次同震位移与累计位移测量原理示意图

剖面1, 2和剖面3, 4位于断层两侧, 每条剖面上的凹下和凸起分别代表冲沟的沟心和山脊的脊线。假定原始的冲沟和山脊均直线展布, 第一次地震发生后, 沟谷和山脊被断层所错断, 其错断距离在断层上的投影即为同震位移。此后再次经历地震事件, 距断层较近的地表会更加破碎, 但离断层较远剖面(即剖面1和4)上的沟心线和山脊线特征依然会保留下来, 其累积的错动距离在断层上的投影代表着累计位移。

1978年, Sieh等人^[43~45]在研究San Andreas断裂南段1857年Fort Tejon地震的同震位移分布时, 就曾经观察到Carrizo Plain段的多条冲沟的累积位移呈现出10, 20和30 m等间距分布的现象, 从而推断该区域内数次古地震事件造成的水平方向位移量大致相等, 被视为Schwartz等人^[46]提出的特征地震模型的最直接证据。近50年以来, 随着越来越丰富的高分辨率航片和卫星影像资料的积累, 基于地貌参照物的滑移距离测量方法已成为活动断裂研究的重要手段。Klinger等人^[47]基于高分辨率卫星影像, 在我国新疆富蕴断层长约110 km的破裂带测量了500余处冲沟沿断层的水平方向位移, 得到1931年富蕴Ms7.9级地震的同震位移约为 6.3 ± 1.2 m。但是, 由

于断层在地表形成的破裂带易受地表侵蚀和改造, 因此通过野外实地测量得到的滑移距离的测量误差往往偏大, 有时甚至会与位移测量值达到同一数量级。而基于高分辨率卫星影像的水平位移测量会忽视参照物在高程方向上的特征, 易造成错判和漏判。2010年, Zielke等人^[18]基于沿San Andreas断层采集的LiDAR数据, 发现之前在野外实地考察或在较低分辨率的影像中均难以辨认的米级冲沟错断, 继而推断1857年Fort Tejon地震在该段的同震位移约为5 m, 而不是之前所认为的10 m^[43~45], 成为LiDAR技术应用于断裂活动性研究的里程碑。

2 数据采集与处理流程

机载LiDAR技术在国外的发展和应用已有近20年的历史, 但在国内尚处于起步阶段。在海原断裂带机载LiDAR扫描项目中, 既面临着海量空间数据的采集、校准、存储处理与可视化等技术性难题, 又担负着活动断裂带高分辨率微地貌形态量化解析的科学目标。项目以我国自行设计生产的运五型飞机为飞行平台, 搭载瑞士Leica公司生产的ALS60型机载三维激光扫描系统完成外业采集。为确定惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)与LiDAR相对框架位置的系统差、GPS天线相位中心与LiDAR系统之间的偏心矢量以及摄站高程系统差, 在执行飞行任务前以平直的机场跑道为检校场完成校准航线飞行, 主要检校内容包括翻滚角、俯仰角和方位角的改正。同时, 考虑测区西部地区地形起伏较大, 维持飞行平台的稳定性相对困难。为避免飞行平台不稳定的GPS信号失锁, 在测区内架设6套GPS地面观测站, 与机载LiDAR的高频GPS接收机同步观测, 用于获得连续精确的实时飞行轨迹。经内业的空间定位、配准、分类和滤波后, 得到WGS84坐标系下UTM投影激光点云和0.1 m分辨率的航空照片。经GPS事后解算校验, 检定LiDAR数据在高程方向的测量中误差优于10 cm, 水平方向的测量中误差优于20 cm。

项目执行期间共完成飞行航线82条, 飞行航线总长度近1000 km。最终数据产品总长度约为128 km, 宽度约为1 km。数据覆盖范围如图3(a)所示, 分别为老虎山段、米家山段、哈思山段、黄家洼山段以及西华山段。上述数据是目前该地区覆盖范围最广、精度最高的数字地形数据。对这些数据的系统整理和分

图 3 LiDAR 数据覆盖情况与哨马饮区段沿线地貌图

(a) LiDAR 数据覆盖范围示意图, 图中蓝色方框指示图 3(b) 的位置; (b) 基于 LiDAR 数据生成的 1 m 分辨率的 DEM 的哨马饮区段沿线 Hillshade 影像, 黄色矩形框指示图 4 位置, 红色三角形标明断层位置

析目前正在进行之中, 本文仅选取海原断裂带东段的哨马饮区段, 展示如何利用高分辨率地形数据快速识别和测定水平和垂直同震位移, 并沿用 Li 等人^[31]炭屑样的 ^{14}C 测年得到的河流阶地年龄, 计算海原断裂带在哨马饮区段的水平和垂直滑动速率。

3 哨马饮区段精细地貌量化研究

哨马饮地处西华山北麓, 断层在该区段发育于西华山山前地形坡度陡变带, 或沿北西向沟谷展布, 断层走向约 305° , 倾向南西, 除了左旋走滑之外, 还具有显著的逆冲分量. 断层两侧有大片基岩出露, 除部分河流阶地和黄土堆积之外, 较少有第四纪地层出露. 断层的南西侧为陡峻的西华山, 海拔高度达到 2703 m, 北东侧海拔高程则一般为 2000~2100 m. 海原断裂带在西华山北麓的活动性表现非常强烈, 在哨马饮形成了宽达 100 m 的基岩破碎带^[25-27]. 同时也造成该区段内的一系列山前冲沟均发生一致性左旋弯曲, 线性构造地貌清晰可见(图 3(b)).

如图 4 所示, 将哨马饮区域内最大规模的冲沟命名为哨马饮河, 并将哨马饮河的支流冲沟分别命名为冲沟 A, B, C 和 D, 海原断裂从东往西依次穿过哨马饮河、冲沟 A 和冲沟 B. 其中, 冲沟 A 和 B 被海原断裂地表破裂错断, 均表现出明显的左旋形态. 由于

图 4 哨马饮流域区域大比例尺地貌填图

冲沟 B 在断裂通过处发育次级冲沟, 改变了断裂冲沟处的沟谷形态, 较难获得可靠的断裂位移数据. 而冲沟 A 的沟谷形态相对完整, 以断裂通过处为中心的上下游沟谷平直, 两侧沟壁均没有遭到太多破坏, 在近断层处发生显著错动, 是随后展开具体研究的区域.

在哨马饮河两岸广泛发育有两级河流阶地, Ta 是低阶地, 河拔高度一般为 2 m 左右, Tb 是高阶地, 其阶地前缘河拔高度一般约为 8 m. Ta 阶地沿哨马饮河两岸呈不连续窄条带状分布, 宽度从几米到十几米不等, 部分区段被冲蚀殆尽, 仅在局部地点有少量残留, 但沿哨马饮河流的流向逐渐变宽. Tb 是高阶地, 宽阔平坦, 沿河流在两岸广泛发育, 在某些位置的宽度可达 100 m. 从图 4 可以清楚地看到, Tb 阶地遭到了强烈的人工改造, 除了西华山山前缓坡被开垦为梯田之外, 阶地表面上曾建立过一个小村庄, 目前已经废弃. 冲沟 A, B, C, D 沟谷形态均为典型的 V 字型, 沟深一般不超过 30 m, 长度从几十米(C 和 D)到一百多米(A 和 B). 上述各冲沟在断层附近均不同程度切割 Tb 阶地, 表明该段冲沟起始发育的年代应晚于 Tb 阶地的废弃年代.

3.1 发现和测定 1920 年海原地震同震位移

同震位移是单次地震时沿发震断裂产生的突发位移, 其空间分布反映了地震发生瞬间断层两盘的剪切破裂运动特征, 是研究发震断层动力学机制的基础. 从 1920 年海原大地震发生到现在只有不到 100 年时间, 距离 20 世纪 80 年代系统测量海原大地震同震位移^[27-30]的时间也只是过去了 60 年, 海原大地震的错动现象至今仍保存相对完好. 哨马饮流域区域距离 1920 年海原大地震最大水平同震位移处(石卡关沟)仅 3 km, 前人曾在哨马饮流域发现强烈地面运动的有力证据, 如一棵临近断裂面的明代柳树在地震中因地表错动而被撕裂, 左旋位移量为 0.4 m^[30], 表明该区域在 1920 年海原大地震时曾经受了强烈的左旋错动, 其同震位移应与在石卡关沟发现的最大位移值(10.2 m)应非常接近. 但是, 前人并未在哨马饮流域范围内得到可靠的同震位移, 仅在哨马饮以东约 700 m 处的一处累计位移为 30 m 的冲沟处发现可能被地震错断后形成的断层面, 错断距离为 8~9 m^[28].

基于 LiDAR 数据的高分辨率地形是最接近真实的全三维地貌, 为发现和测量 1920 年海原地震同震

位移提供了极大的便利. 图 5 显示了哨马饮流域内冲沟 A 在近断层区域的高分辨率的 LiDAR 数据和同步采集的 0.1 m 分辨率航空影像. 其中图 5(a)为 0.1 m 分辨率的航空影像, 尽管没有茂密植被或者人工地物的覆盖, 也只能隐约观察到地表破裂迹线. 图 5(b)是基于 LiDAR 数据生成的 0.2 m 等高距的等高线图, 可清楚地看到在靠近断层处的冲沟东岸, 沿断层破裂有显著的坡壁错动. 将断层两盘沿断层反向滑动 8.6 m 后, 生成如图 5(c)所示的“原始地貌”. 断层两侧的冲沟岸壁面能够较好吻合一致, 表明 1920 年海原地震在该点的水平同震位移约为 8.6 m. 通过对图 5(b)和(c)中的同震位移点恢复, 还能够获得该点的垂直同震位移为 0.8 ± 0.2 m, 这也是在前人研究所未曾观察到的现象.

为验证在 LiDAR 数据中观测到的现象, 我们前往哨马饮区段进行了野外实地考察. 如图 5(d)所示, 在野外发现冲沟的沟壁确被断层左旋错断, 新鲜的断层面尚未完全被后期侵蚀破坏, 依然清晰可见, 从断裂面的形态和两侧沟壁上的植被分布来看, 完全有可能是在 1920 年海原大地震中形成的. 断层两侧的沟壁在断层面的投影距离为 8.6 ± 0.8 m, 垂直方向的高程差约为 0.8 m, 与 LiDAR 数据的测量值完全能够吻合.

哨马饮流域同震位移的发现和精确测量, 不仅直接证明了该区域在 1920 年海原大地震确实曾遭受强烈的左旋走滑错动, 而且定量获取了水平方向和垂直方向的同震位移值, 为海原断裂带构造地貌的量化研究提供了新的契机.

3.2 计算海原断裂左旋走滑速率

断裂滑动速率是在某一时间段内断裂错动的平均速度, 代表着断裂带的长期和平均活动水平, 可以用来比较不同断裂带的相对活动性, 同时它还反映着一条断裂带上应变能释放的速率, 因而是最重要的断裂活动定量参数. 在测定断裂滑动速率时, 通常使用断裂错断水系的位移量 and 对应阶地年龄来估算. Zhang 等人^[29]和 Li 等人^[31]都曾对哨马饮流域内的冲沟 A 开展过研究. 1988 年, Zhang 等人^[29]仅利用皮尺测量了冲沟 A 的位移幅度为 48 m, 再通过放射性碳测年的方法获得阶地 Tb 的年龄, 得到海原断裂全新世以来的滑动速率的下限为 7.6 ± 1.0 mm/a. 2009 年, Li 等人^[31]重新研究了这条冲沟, 发现冲沟内发育有

图 5 哨马饮区段航空影像、LiDAR 数据和实地踏勘照片

(a) 0.1 m 分辨率的航拍图像; (b) 基于 LiDAR 数据生成的等高线图(0.2 m 等高距); (c) 反向滑动 8.6 m 后恢复的“原始地形”; (d) 哨马饮区段近断层处的 1920 年海原地震同震位移照片, 镜头朝向东北

冲沟自身的阶地 Tc(图 6(a)), 通过放射性碳测年得到冲沟 A 所切割的哨马饮流域 Tb 阶地的形成年龄为 18140 ± 350 a BP, 废弃年龄为 13480 ± 310 a BP, 而在冲沟内部发育的次级阶地 Tc 的形成年龄可能为 10150 ± 160 a BP. 同时, 分别以冲沟 A 的沟心线和冲沟 A 的两岸为参考, 获得了滑动距离为 57, 58 和 56 m, 即 57 ± 1 m. 然后用 Tb 阶地的废弃年龄作为位移起始的上限, 而利用阶地 Tc 的形成年龄作为位移起始的下限, 计算得到的断层滑动速率为 4.2 ± 0.8 mm/a.

高分辨率、高精度 LiDAR 数据允许在三维虚拟现实环境中, 以前所未有的细致程度对断层的构造

地貌进行解译和分析, 精确测量冲沟沿断层滑动距离, 从而更好地测定海原断裂在该点的平均滑动速率. 在 LiDAR 数据支持下, 以 0.5 m 等高距的地形图为底图完成区域微地貌填图. 如图 6(a)所示, 冲沟 A 切入哨马饮流域 Ta 和 Tb 两级阶地面, 同时在冲沟 A 内侧发育有次级 Tc 阶地. 利用 Zielke 等人^[18]基于 MATLAB 开发的图形化位错测量软件 LaDiCaoz, 选取冲沟现今的沟心线为地貌参照物, 通过在设定的阈值范围以内垂向移动、水平移动和垂直拉伸逐步拟合位于断层两侧的剖面 1 和剖面 2, 并计算判定系数和回归标准差, 从而得到给定阈值区间内的拟合程

图 6 基于 LiDAR 数据的峭马饮区段构造地貌定量分析

(a) 峭马饮流域内冲沟 A 以 0.5 m 等高距的地形图为基础的地貌填图; (b) LaDiCaoz 软件测量原理示意图; (c) 反向滑动 55.2 m 后恢复的冲沟原始地貌

度(Goodness of fit, GOF)分布情况. 如图 6(b)中所示, 经计算得到沟心线沿断层方向的水平位错距离范围约为 51.3~59.1 m, 即 55.2 ± 3.9 m. 沿断层运动相反的方向, 将断层两盘错动 55.2 m, 得到图 6(c)所示的“原始地貌”. 恢复后的冲沟 A 两侧岸壁和沟心线均具备较好线性特征, 表明冲沟 A 自形成以来所经历所有地震事件导致的累计位移应为 55.2 ± 3.9 m.

由于冲沟 A 在断层附近发育在 Ta 与 Tb 阶地表面上, 其起始发育时间应晚于 Tb 阶地废弃年龄. 而沿冲沟 A 内侧发育的 Tc 阶地的形成年龄显然晚于冲沟 A 的起始发育时间, 表明冲沟 A 的起始发育时间应介于 Tb 的废弃年龄与 Tc 的形成年龄之间. 累计位移是地貌体形成后所经历的位移距离的累加, 那么冲沟 A 沿断层方向的累计位移, 其起始时间可通过 Tb 废弃年龄与 Tc 形成年龄加以限定. 如图 7 所示, 将水平位移测量结果与 Li 等人^[31]的测年结果结合起来, 用于哨马饮区段断层平滑滑动速率计算. 由于 1920 年海原地震在该点的同震位移达 8.6 m, 且距今不到 100 年. 按照张培震等人^[48]提出的利用河流阶地计算走滑断裂滑动速率的方法, 首先将冲沟两岸的岸壁后缘测量的位移, 减去 1920 年海原地震在该点的同震位移后, 再分别除以哨马饮流域 Tb 阶地的废弃年龄和冲沟内部 Tc 阶地的形成年龄, 得到滑动速率的下

限为 3.0~3.8 mm/a, 上限为 4.2~5.1 mm/a, 综合两者后即 4.0 ± 1.0 mm/a.

需要注意的是, 在高分辨率地貌数据的支持下, 更精细的位移测量可以进一步限定了滑动速率可能取值范围, 降低测量的不确定性. 但是实际上, 断裂平均滑动速率是用地貌体(如河流的阶地陡坎、阶地上发育的小冲沟等)的总位移量除以位移累积时间来限定, 而后者往往是间接地用地貌体的年龄来替代. 因此, 活动断裂晚第四纪以来的滑动速率计算中最大的误差和不确定性是来自于地貌体位移量累积时间的界定. 本研究沿用了前人的测年结果^[31], 没有开展进一步的年代学工作, 计算所得断裂滑动速率仍然有赖于测年数据的进一步可靠性检验.

3.3 估算海原断裂垂向抬升速率

虽然利用海原断裂水平错断冲沟水系的数据, Zhang 等人^[29]和 Li 等人^[31]测定了海原断裂的左旋走滑速率, 但由于难以找到可靠的垂直位移数据, 前人的研究中一直没有能够涉及垂直抬升速率. 在 LiDAR 数据支持下, 除了传统的二维场景分析之外, 高分辨率地形数据还允许我们在虚拟的三维环境中, 完成如图 8 所示的三维地貌填图.

王海燕等人^[34]以及樊计昌等人^[35]通过地震波反

图 7 哨马饮断层滑动速率计算

其中的阶地面年龄来自参考文献^[31]的测年结果

图8 哨马饮流域内冲沟A的三维地貌填图

射波形反演得到的海原断层西华山段在深度3 km以内的断层倾角约为 70° 。利用D8法提取冲沟A的沟心剖面线 and 前人研究得到的近地表断层倾角,得到图9(a-1)所示的断层位置示意图。在剖面上将靠近断层的河道剖面线局部放大为图9(a-2),观察到横穿断层的冲沟A除了在二维平面上被左旋错动之外,断层两侧的河道剖面线在断层面上的投影高程差为 0.8 ± 0.2 m。现今河道剖面线的三维空间形态符合海原断裂在该段的运动学特征,具有典型的左旋走滑兼挤压逆冲的特点,投影的高程差与图5中观测得到的垂向位移值一致,应是1920年海原大地震在哨马饮区段的垂向同震位移。

此外,在断层的南西侧,Tc阶地仅留存于冲沟右岸近断层处,阶地面未遭受明显后期侵蚀改造。断层的北东侧,Tc阶地沿冲沟左岸呈条带状分布,沿冲沟A的水流方向展布,宽度稳定为10 m左右。虽然后期发育的次级冲沟和沟壁崩积物对阶地面形态有后期改造,但其剖面线应依然保持一定的线性趋势。基

于Tc阶地的几何形态和空间展布特征,推断冲沟左右两岸的Tc阶地应是同一期次所形成的冲沟内侧堆积阶地,在沟壁的保护下阶地面受到的后期改造相对较小,可视为测量断层两侧相对垂直位错的参考面。即使在断层两侧分别位于冲沟两岸,如果不考虑后期地表改造作用,断层两侧的阶地剖面线应大致呈线性特征。沿着图8中红色虚线在断层两侧Tc阶地面上标示的剖面线位置,得到图9(b)所示的阶地表面的剖面线,发现合成的阶地剖面在靠近断层处有明显的高程变化,完全有可能是由于阶地形成后所记录的构造隆升幅度。假定断层两侧的阶地剖面原始坡度相仿,将断层两侧的阶地剖面线投影至断层面上得到的高程差为 4.0 ± 0.8 m。由于Tc阶地是冲沟A的内嵌阶地,虽然不可避免地受到后期的剥蚀和改造,但是 4.0 ± 0.8 m仍然可以视为Tc阶地形成以来的累计垂向位移距离的极小值。减去1920年海原大地震的垂向位移后,再除以Tc阶地的形成年龄,得到哨马饮区段垂向抬升速率的下限为0.3~0.5 mm/a,

图 9 海原断裂带哨马饮区段的垂直位移测定

(a) 基于河道中心线剖面的垂向同震位移测量; (b) 基于 Tc 阶地地面的垂向累计位移测量

即 0.4 ± 0.1 mm/a.

4 结论

本文基于海原断裂带机载 LiDAR 数据,对哨马饮流域内一条冲沟的构造地貌进行了精细的定量分析,发现并测定了 1920 年海原大地震在哨马饮区段的水平同震位移约为 8.6 m,垂直同震位移约为 0.8 m. 精确测定冲沟累积位移量,降低了测量的不确定性. 在沿用前人测年数据的基础上,得到海原断裂在哨马饮全新世以来的滑动速率可能为 4.0 ± 1.0 mm/a. 此外,通过对冲沟内发育的次级阶地和沟心线剖面的分析,计算得到该研究点海原断裂带全新世以来的垂直累计位移和 1920 年海原大地震的垂直同震位移,以及垂向抬升速率的下限为 0.4 ± 0.1 mm/a.

机载 LiDAR 技术所获得的高分辨率、高精度地

形数据,为活动断裂研究提供了一种全新的技术手段,而新的技术手段和新的数据极有可能进一步加深人们对断层活动特性的理解乃至带来全新的认识. 基于海原断裂带 LiDAR 实验所采集的高分辨率地形数据,我们正在进行整个海原活动断裂的精细地貌填图,初步选取了近 600 余处类似于本文所分析的冲沟及其他各种线状地貌体,用于量化研究自晚第四纪以来的断层滑动速率及其沿断裂走向的变化,分析该地区的古地震事件同震位移的时空叠加效应,认识该地区的地震复发周期和断层活动特性. 此外,未来该区域内如发生强震事件,具有绝对空间坐标的高精度 LiDAR 数据可作为震间期原始地貌,与震后扫描得到的震后地貌进行比对,将有助于深化对地震危险区的地表破裂过程和断层活动特性的理解.

致谢 中国地震局地质研究所甘卫军研究员、梁诗明博士和盛传贞博士参与了本项目的野外 GPS 测量工作;宁夏回族自治区地震局柴炽章研究员、雷启云高级工程师和杜鹏高级工程师在海原断裂带野外地质考察中提供了必要的帮助;审稿人认真细致的评审对本文修改完善起到了至关重要的作用,在此一并表示感谢.

参考文献

- Lal D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: *in situ* nuclides production rates and erosion models. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 104: 424–439
- Cockburn H A P, Summerfield M A. Geomorphological applications of cosmogenic isotope analysis. *Prog Phys Geog*, 2004, 28: 1–42
- 顾兆炎, 郭正堂, Lal D, 等. 黄土和红黏土中宇宙成因核素定年的潜力: ^{10}Be 浓度与化学成分的关系. *第四纪研究*, 2006, 26: 244–249
- 顾兆炎, 许冰, 吕延武, 等. 怒江峡谷构造地貌的演化: 阶地宇宙成因核素定年的初步结果. *第四纪研究*, 2006, 26: 293–294
- Kong P, Na C, Fink D, et al. Cosmogenic ^{10}Be inferred lake-level changes in Sumxi Co basin, Western Tibet. *J Asian Earth Sci*, 2007, 29: 698–703
- Kong P, Na C, Fink D, et al. Erosion in northwest Tibet from *in situ* produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al in bedrock. *Earth Surf Process Landforms*, 2007, 32: 116–125
- Ackermann F. Airborne laser scanning-present status and future expectation. *Int J Photogramm Remote Sens*, 1999, 54: 65–67
- 刘经南, 张小红. 激光扫描测高技术的发展与现状. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2003, 28: 132–137
- Meng X, Wang L, Silvan J, et al. A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LiDAR. *Int J Photogramm Remote Sens*, 2009, 64: 117–124
- Priestnall G, Jaafar J, Duncan A. Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Comput Environ Urban*, 2000, 24: 65–78
- Harding D, Johnson S, Haugerud R. Folding and rupture of an uplifted Holocene marine platform in the Seattle fault zone, Washington, revealed by airborne laser swath mapping. *Geol Soc Am Bull*, 2002, 34: 107
- Haugerud R, Harding D, Johnson S, et al. High-resolution LiDAR topography of Puget Lowland Washington—A bonanza for earth science. *Geol Today*, 2003, 13: 4–10
- Hudnut K, Borsa A, Glennie C, et al. High-resolution topography along surface ruptures of the 16 October 1999 Hector Mine, California, earthquake ($M_w 7.1$) from airborne laser swath mapping. *Bull Seismol Soc Am*, 2002, 92: 1570–1576
- Prentice C S, Mann P, Crone A J, et al. Tectonic geomorphology and seismic hazard of the Enriquillo-Plantain Garden Fault in Haiti. *Nat Geosci*, 2010, 3: 789–793
- Cunningham D, Grebbly S, Tansey K, et al. Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L20308

- 16 Zhou L, Heitaro K, Sakae M, et al. Detection of subtle tectonic geomorphic features in densely forested mountains by very high resolution airborne LiDAR survey. *Geomorphology*, 2013, 182: 104–115
- 17 Frankel K L, Dolan J F. Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data. *J Geophys Res*, 2007, 112: F02025
- 18 Zielke O, Arrowmuth J, Grant Ludwig L, et al. Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas Fault. *Science*, 2010, 327: 1119–1122
- 19 Salisbury J B, Rockwell T K, Middleton T J, et al. LiDAR and field observations of slip distribution for the most recent surface ruptures along the central San Jacinto Fault. *Bull Seismol Soc Am*, 2012, 102: 598–619
- 20 He H L, Wei Z Y, Shi F, et al. Near-field postseismic deformation along the rupture of 2008 Wenchuan earthquake and its implications. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 2535–2541
- 21 Li D R. Remote Sensing in the Wenchuan Earthquake. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2009, 75: 507–509
- 22 马洪超. 激光雷达测量技术在地学中的若干应用. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2011, 36: 347–354
- 23 刘静, 陈涛, 张培震, 等. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂断错微地貌的精细结构. *科学通报*, 2013, 58: 41–45
- 24 Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach. *J Geophys Res*, 1988, 93: 15085–15117
- 25 Burchfiel B C, Zhang P Z, Wang Y, et al. Geology of the Haiyuan Fault Zone, Ningxia Autonomous Region, China and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 1991, 10: 1091–1110
- 26 Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, et al. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian shan, and evidence for a major seismic gap, the “Tianzhu gap”, on the western Haiyuan Fault, Gansu (China). *Geophys J Int*, 1995, 120: 599–645
- 27 Deng Q D, Zhang P Z, Chen S. Structure and deformation character of strike slip fault zones. *Pure Appl Geophys*, 1986, 124: 203–223
- 28 Zhang W Q, Jiao D C, Zhang P Z, et al. Displacement along the Haiyuan fault associated with the great 1920 Haiyuan, China, earthquake. *Bull Seismol Soc Am*, 1987, 77: 117–131
- 29 Zhang P Z, Molnar P, Burchfiel B C, et al. Bounds on the Holocene slip rate of the Haiyuan Fault, north central China. *Quat Res*, 1988, 30: 151–164
- 30 国家地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 海原活动断裂带. 北京: 地震出版社, 1990. 286
- 31 Li C Y, Zhang P Z, Yin J, et al. Late Quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 2009, 28: TC5010
- 32 Lasserre C, Morel P, Gaudemr Y, et al. Postglacial left slip rate and past occurrence of $M \geq 8$ earthquakes on the western Haiyuan fault, Gansu, China. *J Geophys Res*, 1999, 104: 17633–17652
- 33 Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China. *J Geophys Res*, 2002, 107: ETG-4
- 34 王海燕, 高锐, 尹安, 等. 深地震反射剖面揭示的海原断裂带深部几何形态与地壳形变. *地球物理学报*, 2012, 55: 3902–3909
- 35 樊计昌, 李松林, 张先康, 等. 海原断裂在地壳深处的几何形态及其动力学意义. *地震学报*, 2004, 26: 42–49
- 36 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 21–32
- 37 甘卫军, 程朋根, 周德敏, 等. 青藏高原东北缘主要活动断裂带 GPS 加密观测及结果分析. *地震地质*, 2005, 27: 44–57
- 38 Cavalié O, Lasserre C, Doin M, et al. Measurement of interseismic strain across the Haiyuan fault (Gansu, China), by InSAR. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 275: 246–257
- 39 崔笃信, 王庆良, 胡亚轩, 等. 用 GPS 数据反演海原断裂带断层滑动速率和闭锁深度. *地震学报*, 2009, 31: 516–525
- 40 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等. GPS 观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形. *地球物理学报*, 2009, 52: 2491–2508
- 41 Loveless J, Meade B. Partitioning of localized and diffuse deformation in the Tibetan Plateau from joint inversions of geologic and geodetic observations. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 303: 11–24
- 42 屈春燕, 单新建, 宋小刚, 等. 基于 PSInSAR 技术的海原断裂带地壳形变初步研究. *地球物理学报*, 2011, 54: 984–993
- 43 Sieh K E. Pre-historic large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Pallet Creek, California. *J Geophys Res*, 1978, 83: 3907–3939
- 44 Sieh K E. Lateral offsets and revised dates of large earthquakes at Pallet Creek, California. *J Geophys Res*, 1984, 89: 7641–7670
- 45 Sieh K E, Jahns R H. Holocene activity of the San Andreas Fault at Wallace Creek, California. *Geol Soc Am Bull*, 1984, 95: 883–896
- 46 Schwartz D P, Coppersmith K J. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. *J Geophys Res*, 1984, 89: 5681–5698
- 47 Klinger Y, Etchebes M, Tapponnier P, et al. Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China. *Nat Geosci*, 2011, 4: 389–392
- 48 张培震, 李传友, 毛凤英. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率. *地震地质*, 2008, 30: 44–57